

基于面波法和高密度电法的地连墙成槽扰动研究

陈稳¹, 苏昂¹, 刘松玉^{2*}, 白坤^{3,4}, 吴烁^{3,4}, 李伟², 颜庭成⁵

(1. 江苏省交通工程建设局, 江苏 南京 210004; 2. 东南大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210096;
3. 中铁十四局集团有限公司, 山东 济南 250101; 4. 中铁十四局集团大盾构工程有限公司, 江苏 南京 211800;
5. 江苏华东地质建设集团有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要: 地下连续墙是当前地下工程中常见的一种截水、防渗、挡土结构, 在众多轨道交通以及房建工程中都有广泛应用。在地下连续墙施工过程中, 周围土体会受到扰动, 导致各类工程性质参数发生变化。使用瑞雷面波法、高密度电阻率法两种新型试验手段, 以江阴靖江长江隧道江北段明挖隧道为工程依托, 对地下连续墙成槽施工后土体的剪切模量、电阻率变化规律以及扰动范围开展研究。结果表明, 地下连续墙成槽施工后不同位置土体的剪切模量和电阻率变化不一。以剪切模量为评价指标时, 明显扰动区分布在深度 4 m 以上且距槽壁 5.5 m 范围内; 以电阻率为评价指标时, 明显扰动区位于深度 4 m 以下且距槽壁 4 m 以内区域。

关键词: 地下连续墙; 成槽施工; 瑞雷面波法; 高密度电阻率法; 土体扰动; 剪切模量; 电阻率
中图分类号: TU47 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7195(2024)01-0001-07

Study on disturbance of slurry trench grooving based on surface wave method and high-density electrical method

CHEN Wen¹, SU Ang¹, LIU Song-yu^{2*}, BAI Kun^{3,4}, WU Shuo^{3,4}, LI Wei², YAN Ting-cheng⁵

(1. Jiangsu Provincial Transportation Construction Bureau, Nanjing 210004, Jiangsu, China;
2. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China;
3. China Railway 14th Bureau Group Co., Ltd., Jinan 250101, Shandong, China;
4. China Railway 14th Bureau Group Mega Shield Construction Engineering Co., Ltd., Nanjing 211800, Jiangsu, China;
5. Jiangsu Huadong Geological Construction Group Co., Ltd., Nanjing 210000, Jiangsu, China)

Abstract: The underground diaphragm wall serves as a prevalent structure for water interception, seepage prevention, and soil retention in underground engineering. It has extensive application in the construction of various rail transits and housing. The construction of an underground diaphragm wall disrupts the surrounding soils, leading to variations in physical and mechanical properties of the soil. Based on the open-cut tunnel in the north section of Jiangyin Jingjiang Yangtze River tunnel, two new testing methods (Rayleigh surface wave method and high-density resistivity method) were used to study the developing behavior of the shear modulus, resistivity, and the disturbance range of the soil during the excavation of the slurry trench. The findings reveal alterations in both shear modulus and resistivity at various soil positions subsequent to the excavation of the slurry trench. Assessment based on shear modulus indicates a highly disturbed zone situated above 4 m depth and within 5.5 m from the trench, whereas resistivity evaluation shows this zone below 4 m depth and within 4 m from the trench.

Key words: diaphragm wall; grooving construction; Rayleigh surface wave method; high-density resistivity method; soil disturbance; shear modulus; resistivity

0 引言

江苏地区软土分为海相软土、湖相软土以及长

江三角洲冲积相软土^[1], 这些软土分布广泛且厚度大, 具有孔隙比大、压缩性高、含水量高、渗透性差、抗剪强度低、变形时间长等特点, 使得该地区地下工

收稿日期: 2023-05-30

作者简介: 陈稳 (1996—), 男, 安徽宣城人, 硕士, 助理工程师, 主要从事高速公路及过江通道建设工作。E-mail: 927525457@qq.com。

*通信作者: 刘松玉 (1963—), 男, 江苏泰州人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土力学理论、桩基工程、特殊地基和路基稳定、地下空间技术、原位测试技术等方面的研究工作。E-mail: liusy@seu.edu.cn。

程建设中经常面临各种难题,因此研究江苏省软土地区地下工程建设时引起的扰动问题意义重大。

地下连续墙最早出现于1950年的意大利米兰,我国在1958年首次运用。该技术经过多年的发展,已在各类地下工程中得到广泛运用。地下连续墙具有施工设备要求低、刚度高、防渗性能好等优点。然而,地连墙成槽过程会引起周边土体扰动。已有文献^[2]表明,地下连续墙成槽施工在控制参数不合理的情况下,土体地面沉降占至基坑工后总沉降的30%以上。然而,地连墙成槽过程的一系列对周边土体的影响在现阶段的工程设计中常被忽略,严重影响工程的质量安全。因此成槽施工对土体扰动影响的研究对施工安全控制具有重要作用。

土体扰动是指由于土体应力状态或固结状态的变化等导致土体结构的破坏和变化^[3]。土体发生扰动后,很容易诱发一系列工程安全和环境问题。当前学者主要通过室内试验法和现场原位测试法评价土体扰动度。在室内试验方面,研究人员选取了不同指标评价土体扰动度,如残余孔隙水压力^[4]、屈服应力^[5]、残余应力^[6]、剪应变^[7]、孔隙比变化量^[8]、球应力和偏应力^[9]等指标。基于原位测试评价土体扰动度方面,现有研究选取了十字板剪切强度、锥尖阻力^[10]和剪切波速^[11]等指标评价土体的扰动度。由于室内试验方法不能完全真实地体现原位土体的应力状态,因而对工程施工土体扰动的评价缺乏说服力;与之相比,原位测试方法能够获取施工过程中土体原位参数的变化,可较为准确地评价工程施工引起的土体扰动。然而,通过原位测试方法针对地连墙成槽扰动问题的相关研究鲜见报道。

瑞雷面波法和高密度电阻率法是目前较为成熟的原位测试方法。一些学者对瑞雷面波法和高密度电阻率法的工程应用进行了研究。利用瑞雷面波法,欧阳锋等^[12]开展了注浆加固及强夯地基检测,李波等^[13]开展了隧道仰拱厚度检测,FAN等^[14]开展了裂缝宽度和深度检测。利用高密度电阻率法,MOHAMMED等^[15]推导了电阻率与液/塑限、自由膨胀度的经验关系,PERRONE等^[16]使用该技术识别滑坡几何特征、潜在不稳定区域,任丽元等^[17]检测了黄河大堤锥探灌浆效果。从现有研究来看,利用瑞雷面波法和高密度电阻率法评价土体扰动度的相关研究还有待进一步开展。

基于以上分析,本文针对地下连续墙槽段施工对土体的扰动问题,以江阴靖江长江隧道江北段明挖隧道为依托,采用现场瑞雷面波法和高密度电阻

率法,对地下连续墙成槽施工后土体的剪切模量、电阻率变化规律以及扰动范围开展研究,比较扰动区分布范围和空间上的变化趋势,为实际施工提供参考。

1 工程概况

江阴靖江长江隧道工程主线约11.285 km,分为江北明挖段、盾构段、江南明挖段。采用明挖法进行施工,明挖段约1500 m。通过槽壁加固、地下连续墙、SMW工法桩、拉森钢板桩、三轴搅拌桩、MJS旋喷桩地基加固进行围护结构施工。

江北段地下连续墙主要分布在工作井四周和后续段长条形基坑的两侧。工作井南北长度25 m,东西长度53.6 m,开挖深度29.4 m。工作井及后续段四周由地下连续墙进行围护,地下连续墙厚1.2 m,最深60 m。具体围护结构分布见图1。

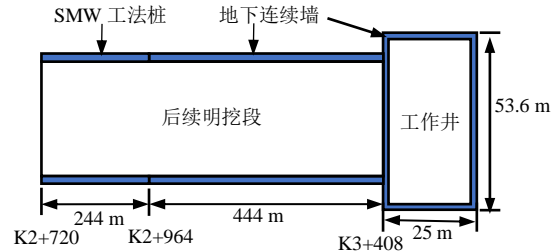


图1 围护结构分布示意图

Fig. 1 Distribution of the bracing structure

该工程位于典型长江漫滩地层,上部分布有弱透水粉质黏土层,其下为深厚承压含水层(粉土、粉砂层及中粗砂等),地质条件差,地下承压水位高,且与长江存在水力联系,工作井及后续明挖段地下连续墙槽段所处位置的地质情况如图2所示。

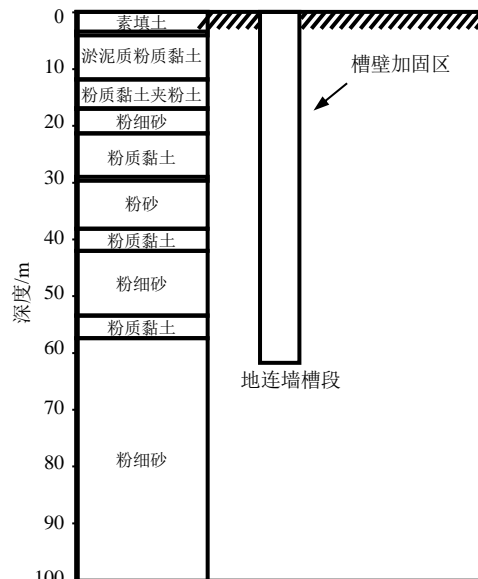


图2 槽段周边地质图

Fig. 2 Geological map around the trench section

地下连续墙两侧采用导墙及 $\Phi 850@600$ mm 单排三轴搅拌桩槽壁加固, 加固深度 25 m。导墙翼宽 1.2 m, 翼厚 0.2 m, 肋厚 0.2 m, 总高度约 1.5 m, 采用 C25 混凝土。

2 测试设备与方法

2.1 瑞雷面波试验

测试使用的面波记录仪为上海岩联工程技术有限公司生产的 YL-SWS 面波测试仪。检波器为上海岩联工程技术有限公司生产的速度型传感器, 测试深度为 20 m。锤击设备选用 20 kg 的重锤。测试时, 在江阴靖江长江隧道明挖段选取一处槽段, 开展地下连续墙成槽前后的现场测试, 面波试验测线布置如图 3 所示。每条测线长度为 12 m, 检波器间距 1.0 m, 激发偏移距(即震源与第一个检波器的距离)分别为 3.0 m、5.0 m、8.0 m。

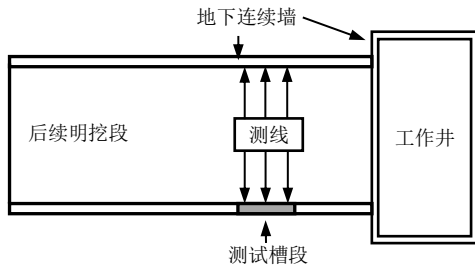


图 3 面波试验测线布置示意图

Fig. 3 Arrangement of surface wave test measuring lines

测试过程为: 从测线起点开始, 隔 1.0 m 的间距共布置 24 个检波器, 每个检波器在竖直方向上与土体紧密接触。连接检波器与面波记录仪, 并设置传感器通道的增益。测试传感器安装情况, 检查无误后, 选择不同的偏移距, 布置震源。采样时, 激发震源, 读取并保存数据。

2.2 高密度电阻率试验

现场高密度电阻率测试所用设备为 ABEM 公司生产的 Terrameter LS 2 高密度电阻率仪, 主要包括铜电极、电极夹、电缆、电法仪、电源 5 个部分。将 81 根电极插进土体后, 用电极夹、电缆将电极与电法仪相连, 接通电源之后即可对该测线进行测量。

进行现场测试的测线位置与面波试验相同。成槽前后在槽段对应的横断面选择 2 条测线, 由于现场条件限制, 沿地连墙长度的断面未能布置测线。受明挖段基坑的宽度限制, 测线长度为 40 m, 电极间距 0.5 m, 共布置 81 个电极。测试过程为: 将电极、电缆与电法仪对应连接, 连接完毕后打开电法仪, 测试电极安装情况。检查无误后, 开始正式测

量, 每条测线要在三处电缆连接处进行测试, 分别在成槽前后各测试一次。

3 测试结果

3.1 剪切模量

瑞雷波的传播速度与剪切波速有式(1)的近似关系^[18]:

$$V_R = \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} V_s \quad (1)$$

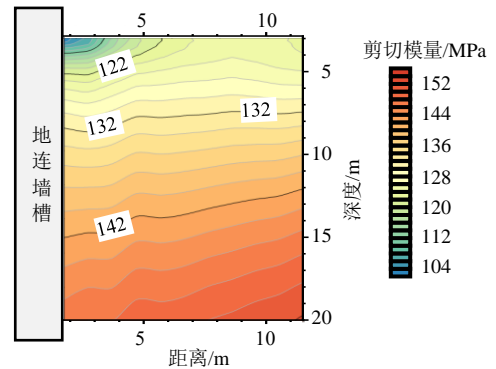
式中: ν 为地层的泊松比; V_R 为瑞雷波波速; V_s 为剪切波速。

通过式(2)^[19]将剪切波速转换为剪切模量:

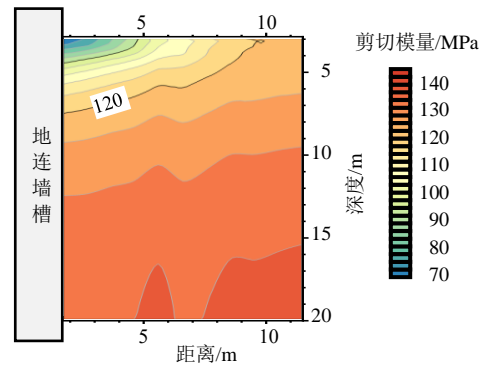
$$G = \rho V_s^2 \quad (2)$$

式中: G 为剪切模量; V_s 为剪切波速; ρ 为体积密度。

图 4 为成槽前后槽段横断面土体剪切模量分布图。从图 4 中可以看出, 地下连续墙所处断面的整体情况为浅部土体剪切模量较小而深部土体剪切模量较大。靠近地下连续墙处的土体剪切模量较小, 远离地下连续墙处的土体剪切模量较大。施工成槽后, 槽段附近土体剪切模量整体变小。



(a) 成槽前



(b) 成槽后

图 4 成槽前后槽段横断面土体剪切模量分布图

Fig. 4 Shear modulus distribution of cross-sectional soil before and after grooving

3.2 电阻率

对现场采集后的数据采用 Res2dinv 软件进行处理分析,采用平滑约束的最小二乘法进行初步处理,再将视电阻率转化为真电阻率。在反演过程中,共进行 5~7 次迭代,直至计算结果的均方根误差达到所设置的误差范围内。成槽前后槽壁横断面土体电阻率分布如图 5 所示。

从图 5 中可以看出,成槽前后土体电阻率分布情况整体未发生明显变化,浅层 2 m 深度范围内的杂填土有些许变化,这可能是由于场地内的设备发生移动或是天气温度等变化使浅层土体的密度和含水量发生变化所致。2~6 m 深度范围内的土体整体变化不明显,说明地下连续墙成槽对所处断面深层土体的电阻率影响不大。地下连续墙附近土体低电阻率区域的范围增加,这可能是由于成槽施工时槽段内泥浆丰富,泥浆中的水分有一部分渗透进周围的土体里,从而使电阻率值降低,低电阻率区域范围扩大。

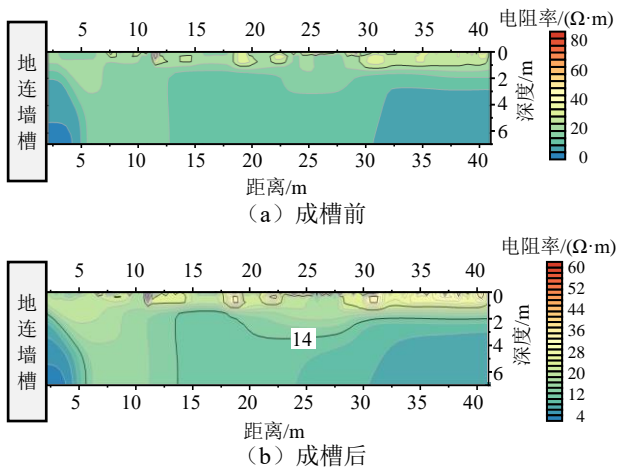


图 5 成槽前后槽壁横断面土体电阻率分布图

Fig. 5 Resistivity distribution of cross-sectional soil before and after grooving

4 地下连续墙成槽施工扰动度评价

4.1 基于剪切模量的扰动度评价

(1) 剪切模量变化规律

将地下连续墙成槽前后不同位置土体剪切模量的变化情况部分绘制于图 6。从图 6 中可以看出,距地连墙槽段不同位置处土体的剪切模量在成槽施工后都会有变小的趋势,其中靠近地下连续墙处土体的剪切模量变化更明显。在同一水平位置处,浅部土体的剪切模量在成槽施工前后变化量更大,10 m 深度以下土体的剪切模量变化相对较小。

(2) 基于剪切模量的土体扰动度

以成槽前后土体的剪切模量作为评价指标,提

出地下连续墙成槽施工扰动度 SDD 的计算公式:

$$SDD = \frac{G_0 - G'}{1 + \nu} V_s \quad (3)$$

式中: G_0 为成槽施工前土体的剪切模量; G' 为成槽施工后土体的剪切模量。

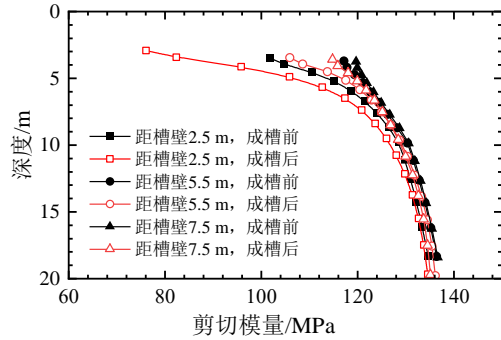


图 6 成槽前后不同位置土体剪切模量变化图

Fig. 6 Variations of shear modulus of soils at different positions before and after grooving

依据 MENG 等^[20] 对扰动区的划分标准,将扰动度 $SDD \geq 10\%$ 的区域视为明显扰动区,将扰动度 $SDD < 10\%$ 的区域视为微小扰动区。

按照式 (3) 计算得出基于剪切模量的土体扰动度分布,分布情况如图 7 所示。有必要说明,浅部 3 m 深度以内、距槽壁 1.5 m 以内的数据缺乏,这是由于现场成槽施工使得靠近地下连续墙处的土体被泥浆和清水覆盖,瑞雷面波试验未能覆盖这部分区域。从图 7 中可以看出,在成槽施工后,同一位置处土体的扰动度沿深度方向整体上具有由大变小的趋势。8 m 深度以上土体的扰动度较大且变化趋势较快,8 m 深度以下土体扰动度较小,基本低于 2%。4 m 深度以上,同一深度处距地连墙槽壁越近,土体的扰动度越大。深度 4 m 以上且距地连墙槽壁约 5.5 m 以内土体的扰动度在 10% 以上,视为明显扰动区,其余区域土体扰动度小于 10%,视为微小扰动区。

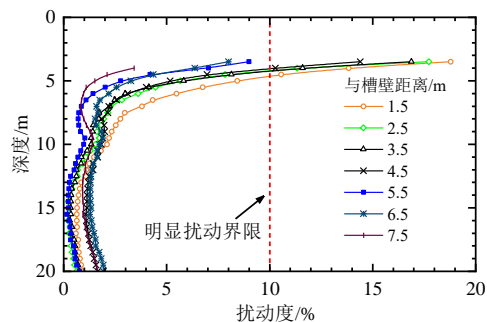


图 7 基于剪切模量的土体扰动度分布图

Fig. 7 Distribution of soil disturbance degree based on shear modulus

通过 Excel 将地下连续墙断面不同位置的扰动度 SDD 筛选出大于 10% 的部分, 该部分为明显扰动区, 再将数据导入 Surfer 软件, 绘制基于剪切模量的土体扰动区分布图, 如图 8 所示。从图 8 中可以看出, 土体越靠近地连墙槽壁且深度越浅, 受扰动程度越高。明显扰动区主要分布在距槽壁 5.5 m 且深度 4 m 以内范围。根据结果可推断得出, 测试数据缺乏的 3 m 深度以上且靠近地下连续墙处土体处于明显扰动区, 但深度较大且紧邻地连墙槽壁处 (1.5 m 以内) 的扰动度是否大于 10% 还需进一步研究。

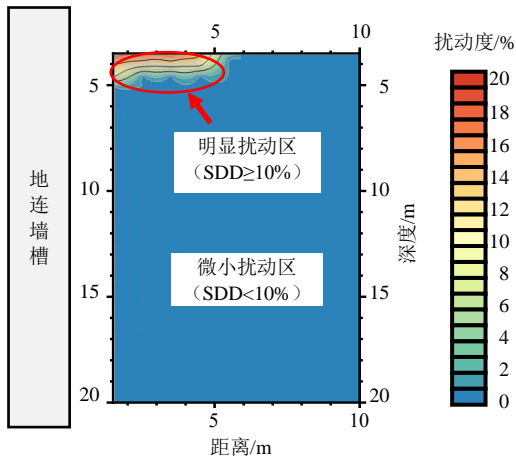


图 8 基于剪切模量的土体扰动区分布图

Fig. 8 Distribution of soil disturbance area based on shear modulus

4.2 基于电阻率的扰动度评价

(1) 电阻率变化规律

将地下连续墙成槽前后不同位置处土体电阻率的变化情况部分绘制于图 9。从图 9 中可以看出, 地连墙成槽后, 距槽壁 10 m 以内且深度位于 2 m 以下的土体电阻率总体具有降低的趋势, 而深度 2 m 以上土体电阻率在成槽前后相差不大。这可能是由于深度 2 m 内存在导墙, 导墙对土体的保护作用使得 2 m 深度内开挖引起的扰动较小, 而 2 m 深度以下的土体则在开挖后受到的扰动较大。

(2) 基于电阻率的土体扰动度

对于饱和土体, 电阻率的降低代表土体的孔隙率和含水量提高, 因此, 土体的压缩性和强度也会降低。本文以成槽施工前土体的电阻率 ρ_0 和成槽施工后土体的电阻率 ρ' 作为评价参数, 提出地下连续墙成槽施工的扰动度 SDD 公式, 用于近似估算土体力学性质的扰动程度。

$$SDD = \frac{\rho_0 - \rho'}{\rho_0} \times 100\% \quad (4)$$

根据式 (4) 可得出距槽壁一定距离处施工前后基于电阻率的土体扰动度分布, 如图 10 所示。从图

10 中可以看出: 总体上, 成槽后距槽壁一定位置处土体的扰动度沿深度方向具有由小变大的趋势, 在 4 m 深度以内土体扰动度基本保持在 10% 以内。距地连墙 2 m 范围内土体的扰动度较大, 此范围内深度 6.7 m 处的土体扰动度达到 40% 左右。这主要是由于深度 4~6.7 m 范围内的土体电阻率值较低, 大小为 $5 \Omega \cdot m$ 左右, 因此较小的电阻率值变化就会引起较大的扰动度。

通过 Excel 将不同位置的扰动度 SDD 筛选出大于 10% 的部分, 该部分定义为明显扰动区, 再将数据导入 Surfer 软件, 绘制基于电阻率的土体扰动区分布图, 如图 11 所示。从图 11 中可以看出, 明显扰动区主要分布在距地连墙 4 m 范围以内且深度位于 4 m 以下, 其余部分均为微小扰动区, 表明距槽壁 4 m 范围内的土体电阻率变化较大, 这可能是由于土体卸荷、泥浆的水分迁移和成槽机对土体的切削和挤压造成的。在现场 40 m 长测线、电极间距 1 m 的实验情况下, 高密度电测试所得出的电阻率结果只显示到地下 6.7 m 深度处, 这是由于现场条件限制, 测线在横断面上土体区域只有 40 m 长, 其余部分为硬化路面, 不适用于高密度电测试, 因此所能探测到的土体比较浅, 更深位置处的土体电阻率变化有待进一步研究。

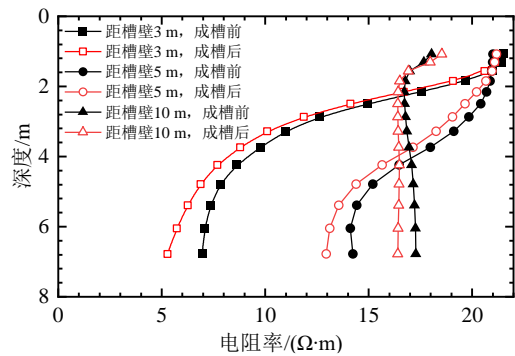


图 9 成槽前后不同位置处土体电阻率变化

Fig. 9 Variations of soil resistivity at different positions before and after grooving

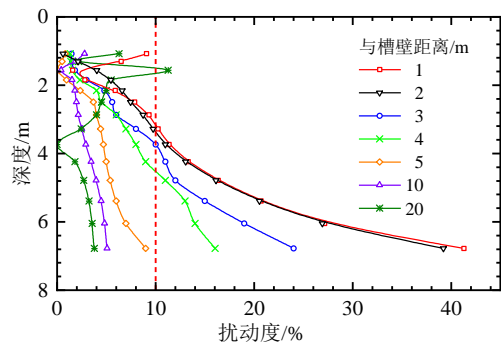


图 10 基于电阻率的土体扰动度分布图

Fig. 10 Distribution of soil disturbance degree based on resistivity

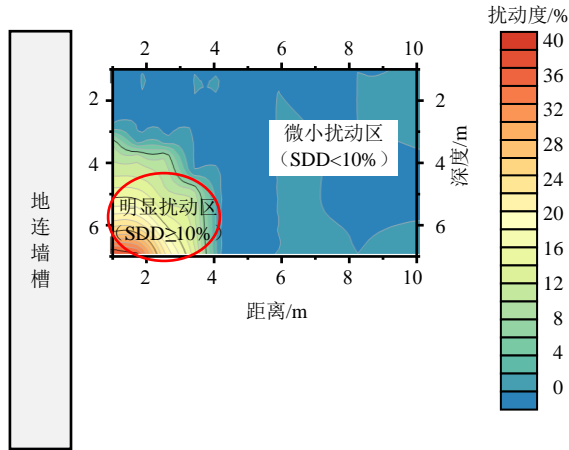


图 11 基于电阻率的土体扰动区分布图

Fig. 11 Distribution of soil disturbance area based on resistivity

5 结论

本文针对地下连续墙槽段施工对土体的扰动问题,以江阴靖江长江隧道江北段明挖隧道为工程依托,在工作井处地下连续墙成槽时进行现场瑞雷面波法和高密度电阻率法试验,对地下连续墙成槽施工后土体的剪切模量、电阻率变化规律以及扰动范围开展研究。主要结果如下:

(1) 瑞雷面波法测试结果表明,成槽施工后土体剪切模量变小,槽壁附近和浅部土体剪切模量变化量更明显,10~20 m 深度土体剪切模量基本未变化;以扰动度 10%为界,明显扰动区主要分布在深度 4 m 以上且距槽壁 5.5 m 范围内;靠近槽壁土体的扰动度更高,最高达到 20%左右。

(2) 高密度电阻率法测试结果表明,成槽施工后深度 2 m 以下且距槽壁 10 m 范围内的土体电阻率明显变小,而在 2 m 深度以上基本无变化;明显扰动区位于深度 4 m 以下且距槽壁 4 m 范围内的区域;靠近槽壁土体的扰动度更高,最高达到 40%左右。

参考文献

[1] 周海铭,刘松玉,朱志铎.江苏省高速公路软土地基特点及处理方法分析[C]//2009年江苏省地基基础年会(江苏省2009年岩土工程联合学术年会).江苏徐州,2009:209-213.
ZHOU Hai-ming, LIU Song-yu, ZHU Zhi-duo. Analysis on characteristics and treatment methods of soft soil foundation of expressway in Jiangsu Province[C]//2009 Jiangsu Foundation Annual Meeting (2009 Jiangsu Geotechnical Engineering Joint Academic Annual

Meeting). Xuzhou, Jiangsu, 2009: 209-213.

[2] MORTON K, CATER R W, LINNEY L. Observed settlements of buildings adjacent to stations constructed for the modified initial system of the mass transit railway, Hong Kong[C]//Proceedings of the 6th Southeast Asian Conference of Soil Engineering. Taipei, China, 1980: 415-429.

[3] 李玲玲. 结构性软土的性状研究及其应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
LI Ling-ling. Behavior of structured clay and its application[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.

[4] 魏汝龙. 软粘土的强度和变形[M]. 北京: 人民交通出版社, 1987.
WEI Ru-long. Strength and Deformation of Soft Clay[M]. Beijing: China Communications Press, 1987.

[5] NAGARAJ T S, MURTHY B R S, VATSALA A, et al. Analysis of compressibility of sensitive soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 116(1): 105-118.

[6] 陈明星. 海南某港口勘察取样中取土扰动若干影响因素分析研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010.
CHEN Ming-xing. Study on effects of sampling disturbance in port prospecting at Hainan Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2010.

[7] 徐永福. 土体受施工扰动影响程度的定量化识别[J]. 大坝观测与土工测试, 2000, 24(2): 8-10.
XU Yong-fu. Quantitative determination of disturbance degree of soils influenced by construction[J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 2000, 24(2): 8-10.

[8] 李家平. 取土扰动对土的抗剪强度的影响机理研究[D]. 上海: 同济大学, 2002.
LI Jia-ping. Research on mechanism of influence to shear strength by disturbance during sampling[D]. Shanghai: Tongji University, 2002.

[9] 陈宝, 徐胜文, 彭芳乐, 等. 下穿越工程施工微扰动评价指标试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊 1): 2682-2689.
CHEN Bao, XU Sheng-wen, PENG Fang-le, et al. Experimental study of indices for evaluating small disturbance in underground-crossing construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S1): 2682-2689.

[10] 陈云敏, 胡琦, 陈仁朋. 杭州地铁湘湖车站基坑坍塌引起的基底土深层扰动与沉降分析[J]. 土木工程学报, 2014, 47(7): 110-117.
CHEN Yun-min, HU Qi, CHEN Ren-peng. Soil

- disturbance by the collapse of retaining wall for a pit excavation and the induced additional settlement: a case study of Hangzhou Metro Xianghu Station[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2014, 47(7): 110-117.
- [11] 浙江大学. 一种利用剪切模量变化计算软土结构性扰动度的方法: 中国, CN201610905651.4[P]. 2018-12-14.
Zhejiang University. Method for calculating structural disturbance degree of soft soil by utilizing changes of shear modulus: China, CN201610905651.4[P]. 2018-12-14.
- [12] 欧阳锋, 文辉辉. 瑞雷面波在注浆加固及强夯地基检测中的应用[J]. *中国水运(下半月)*, 2020, 20(4): 217-219.
OUYANG Feng, WEN Hui-hui. Application of Rayleigh wave in grouting reinforcement and dynamic compaction foundation detection[J]. *China Water Transport*, 2020, 20(4): 217-219.
- [13] 李波, 周斌, 奉建军. 瑞雷面波法在铁路隧道仰拱厚度检测中的应用[J]. *现代隧道技术*, 2021, 58(5): 173-178.
LI Bo, ZHOU Bin, FENG Jian-jun. Application of Rayleigh wave method in detection of invert thickness of railway tunnels[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2021, 58(5): 173-178.
- [14] FAN J W, MA T, ZHANG W G, et al. Inner dimension detection of open and buried crack in asphalt pavement based on Rayleigh wave method[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 328: 127003.
- [15] MOHAMMED M A, SENOSY M M, ABUDEIF A M. Derivation of empirical relationships between geotechnical parameters and resistivity using electrical resistivity tomography (ERT) and borehole data at Sohag University site, upper Egypt[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2019, 158: 103563.
- [16] PERRONE A, LAPENNA V, PISCITELLI S. Electrical resistivity tomography technique for landslide investigation: a review[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 135: 65-82.
- [17] 任丽元, 武冬梅, 韩仲凯. 高密度电阻率法在东明黄河大堤锥探灌浆效果检测中的应用[J]. *山东水利*, 2007(9): 27-28.
REN Li-yuan, WU Dong-mei, HAN Zhong-kai. Application of high-density resistivity method in the detection of cone-probe grouting effect of Dongming Yellow River levee[J]. *Shandong Water Resources*, 2007(9): 27-28.
- [18] 达斯. 土动力学原理[M]. 吴世明, 顾尧章, 译. 杭州: 浙江大学出版社, 1984.
DAS B M. Principle of Soil Dynamics[M]. WU Shi-ming, GU Yao-zhang, trans. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1984.
- [19] TURESSON A. A comparison of methods for the analysis of compressional, shear, and surface wave seismic data, and determination of the shear modulus[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2007, 61(2): 83-91.
- [20] MENG F Y, CHEN R P, KANG X. Effects of tunneling-induced soil disturbance on the post-construction settlement in structured soft soils[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 80: 53-63.